

# Bi-2223 초전도테이프의 임계전류 열화특성에 미치는 횡방향 압축응력의 영향

신형섭<sup>\*</sup>, 김병수<sup>\*\*</sup>, 오상수<sup>\*\*\*</sup>, 하동우<sup>\*\*\*</sup>, 하홍수<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup> 안동대학교, <sup>\*\*</sup> 안동대학교 대학원, <sup>\*\*\*</sup> 한국전기연구원 초전도응용연구팀

## Effect of transverse compressive stress on $I_c$ degradation characteristics in Bi-2223 superconducting tapes

H. S. Shin<sup>\*</sup>, B. S. Kim<sup>\*\*</sup>, S. S. Oh<sup>\*\*\*</sup>, D. W. Ha<sup>\*\*\*</sup>, H. S. Ha<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup> Andong National University, <sup>\*\*</sup> Andong National University, Graduate School, <sup>\*\*\*</sup> Korea Electrotechnology Research Institute

E-mail: [hsshin@andong.ac.kr](mailto:hsshin@andong.ac.kr)

**Abstract** - Influences of transverse compressive stress on the critical current ( $I_c$ ) in AgMg and AgMn alloy sheathed Bi-2223 tapes were investigated at 77 K and 0 T. The  $I_c$  degradation behavior depending on sample specifications was discussed in viewpoints of  $n$ -value and damage morphology. As a result, Bi-2223 tapes showed a significant drop in  $I_c$  for stresses greater than 50MPa. The AgMg sheathed Bi-2223 tapes representing higher  $I_c$  showed a lower  $\sigma_{irr}$  and a significant  $I_c$  degradation with increase in compressive stress. There existed a voltage tap separation dependency of the  $I_c$  degradation behavior caused by the transverse compressive stress.

### 1. 서 론

Bi-기 산화물 고온 초전도체의 제작기술과 냉동공학의 지속적인 발전은 고자장 마그네트와 다양한 전력기기와 같이 보다 실제적인 응용분야에 HTS선재 사용에 대한 기대를 높여 오고 있다. 이러한 초전도체를 마그네트에 적용하게 되면, 제작, 냉각, 운전시 여러 가지 형태의 응력 또는 변형률을 받게 된다[1]. 그 예로, 와인딩부에서 후프응력(인장변형률), 냉각시 열수축률 차에 따른 압축변형률, 선재의 와인딩 과정에서 발생하는 굽힘 변형, 그리고 와인딩시의 국부적인 접촉이나 코일부 체결시 가해지는 압력으로 인한 횡방향압축 응력 등을 들 수 있다. 특히, 높은  $J_c$ 와 고자장은 초전도테이프에 큰 로렌츠력을 미치게 되어 후프응력뿐만 아니라 도체의 횡방향압축 응력을 발생시키게 된다. 따라서 코일이나 마그넷, 모터와 같은 응용분야에서는 물론 초전도케이블의 경우도 굽힘을 받게 되면 이것은 굽힘변형 뿐만 아니라 테이프 상호간에 밀착을 가져와 횡방향 압축응력도 발생시키게 된다[2,3]. 그러나 마그넷이나 코일의 와인딩 또는 운전중 발생하는 횡방향 압축응력에 따른 Bi-2223 테이프의 임계

전류의 열화 특성에 관해서는 아직 알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 부과응력의 관리를 통한 초전도 코일의 적용분야 확대를 위해서는 HTS의 임계전류의 저하에 미치는 횡방향압축의 영향에 대한 연구 또한 필요하다.

따라서 본 연구에서는 분말조성과 열처리 조건을 달리한 KERI시작 선재인 Bi-2223 초전도 테이프의 임계전류 열화거동에 미치는 횡방향 압축 응력의 효과를 조사하였고, AMSC선재의 경우와 비교 검토하였다. 이러한 연구결과는 HTS선재의 사용자와 고자장 마그네트 및 전력기기용 코일 설계 및 제작을 위한 중요한 데이터를 제공한다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 시험편

본 연구에서 사용한 고온초전도테이프는 한국전기연구원(KERI)에서 '초전도 케이블용 고강도 PIT선재 개발' 연구과제의 일환으로 PIT법을 사

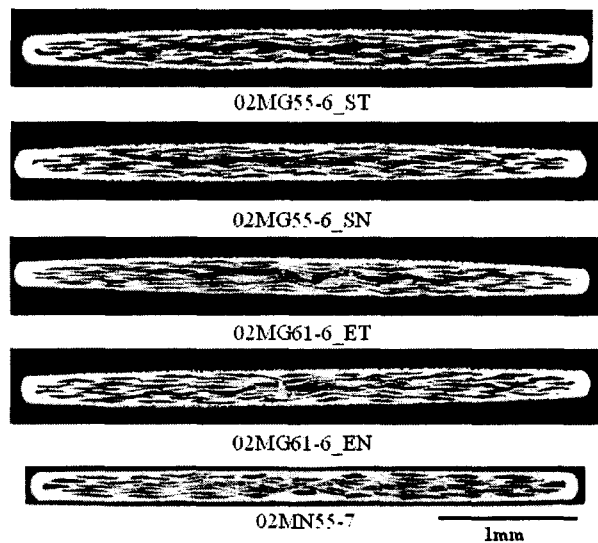


Fig. 1. Cross-sectional view of Bi-2223 superconducting tapes.

Table 1. Properties of Bi-2223 multifilamentary superconducting tapes.

Sample ID	Sample size (mm)	Filament No.	$I_c$ at 77K S.F [A]	n value at $I_{c0}$
MG55-T	4.1 x 0.26	55	11	6.5
MG55-N	4.1 x 0.26	55	18.6	9
MG61-T	4.1 x 0.26	61	63	14
MG61-N	4.1 x 0.26	61	43	15
MN55-N	4.1 x 0.26	55	38.7	11

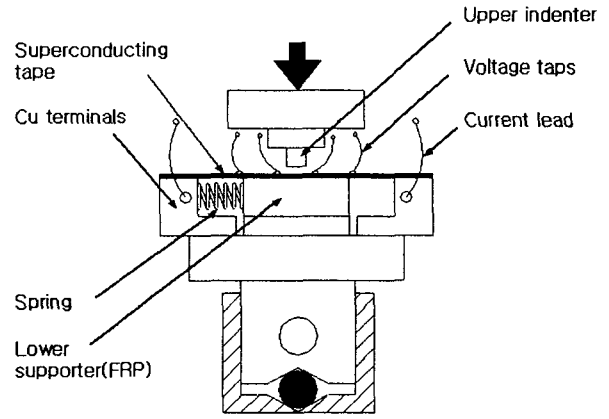
용하여 시험제작한 AgMg합금, AgMn합금시-스 Bi-2223 다심 선재로, 55심과 61심의 필라멘트로 나눌 수 있다. Fig. 1은 시험에 사용한 Bi-2223테이프의 단면을 나타낸 것이며, Table 1은 테이프의 특성치를 나타낸 값이다. 시료 색인에서 MG는 Ag-0.2wt%Mg합금을, MN은 Ag-0.3wt%Mn합금을 각각 시-스재로 사용한 경우를 나타낸다. 55심선과 61심선은 초기 분말조성을 달리한 것이고, 부착된 기호 T와 N은 각각 초기 열처리 실시유무를 나타낸다. 한편 n 값은 횡방향 압축시험시 무가압 상태에서 얻은 I-V선도에서 측정된 값을 나타낸다.

## 2.2 횡방향 압축시험

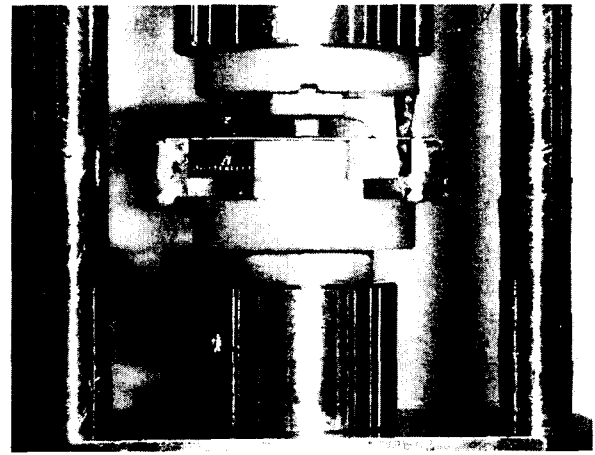
Bi-2223 테이프의 임계전류에 미치는 횡방향 압축응력 효과의 측정은 초전도테이프의 하부에 GFRP판으로 지지한 상태로 상부에서 폭 5mm의 Ti합금과 GFRP (G10재)로 제작한 압력블록을 사용하여 실시하였다. 압력블록을 통한 시험편의 가압에는 유압식 만능재료시험기(Instron 8516, 하중용량 5 kN)를 사용하였다. Fig. 2는 압축시험을 위한 장치의 (a)모식도와 (b)구성 치구 설치 사진을 나타내고 있다.

상온에서 Cu단자의 양단에 시료를 납땜으로 부착한 후 77K까지 냉각하면, 시료홀더와의 열수축률 차에 따라 시료의 길이방향으로 압축변형이 발생하게 된다. 이에 따른 영향을 제거하기 위하여, 한쪽 Cu단자의 시료의 길이방향 이동을 허용한 후 압축스프링을 설치하여 냉각시 예상되는 테이프의 열수축으로 인한 변형이 완화되도록 고안하였다. 또한 하부 홀더는, Fig. 2(a)에 보인 바와 같이, 구면접촉을 통해 지지됨으로서 측정렬이 불완전한 경우에도 상부 압력블록과 시료가 완전한 면접촉을 통해 압축이 이루어지도록 하였다. 압축시험은 77 K, 0 T에서 실시하였다. 하중을 계단상으로 증가시켜 가면서, 임계전류를 측정하였다. 이때 시험편에 가해진 평균압축응력은 편의상 압축하중의 작용 방향으로 투영한 시료면적으로 작용하중을 나누어 구하였다. 측정은 시료의 편차 등을 고려하여 각 종류마다 2회씩 실시하였다.

Bi-2223테이프의  $I_c$  측정을 위해 길이가 68 mm인 시료의 중앙부에 압입부를 두고, 양쪽으로



(a) Schematic illustration



(b) Set-up for testing

Fig. 2. Appearance of apparatus used in transverse compressive test of Bi-2223 tapes.

각각 2개씩 전압단자를 10 mm 간격으로 설치하였다. 그리고 전자단자간격을 10 mm와 30 mm로 한 경우에 대하여  $I_c$ 값을 4 단자법을 사용하여  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 전기장 기준으로 측정하였다. 이때, 발생하는 전압  $V$ 는 초전도상태에서 상전도 상태로의 천이구간에서 측정하였다. 통상 전압은 전류의 함수로 나타내, 식 (1)의 관계를 나타내게 된다.

$$V = cI^n \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 발생전압,  $I$ 는 부가전류, 그리고  $c$ 는 상수 값을 나타낸다. 변형을 변화에 따른  $n$ 값은  $0.2 \sim 5 \mu\text{V}/\text{cm}$ 영역에서  $\log V$ 와  $\log I$ 사이의 직선 구간 선형 피팅으로 구하였다. 이렇게 구한  $n$  값의 거동은 테이프 선재의 횡방향 압축응력 하에서 발생하는 균열과 같은 손상의 발생 및 진전 거동의 간접 추정을 가능케 한다.

$I_c$  측정 후, 초전도테이프에 발생한 손상양상을 관찰하기 위해 암모니아( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), 그리고 물( $\text{H}_2\text{O}$ )의 체적비를 24 : 24 : 1로 혼합한 에칭액을 사용하여, 은(Ag)시-스재를 벗겨낸 다음, 금속광학현미경과 주사현미경(SEM)을 사용하여 초전도 필라멘트에서 균열발생 양상을

관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 MG61-T시험편에 대해 상부압력 블록의 재질을 Ti합금과 GFRP(G10)재로 달리한 경우 횡방향 압축시험을 통해 얻어진  $I_c/I_{c0}$ - $\sigma$ 관계를 나타낸 것이다. 각 압축응력 조건에서 얻어진  $I_c$ 는 77 K,  $\sigma=0$  MPa인 경우의 임계전류  $I_{c0}$ 로 나누어서 무차원화하여 나타내었다. 또한 전압단자를 압축영역에 가깝게 10 mm 간격으로 설치한 경우와 30 mm로 다소 간격을 두고 설치한 경우에 대한 결과를 나타내고 있다.

먼저 전압단자간 거리에 따른 영향을 살펴보면, 10 mm 구간에서 측정한 경우 비교적 낮은 응력에서부터 임계전류가 저하하기 시작하였고 30 mm 구간에 대한 경우보다 훨씬 현저한 저하 거동을 나타내었다. 여기서  $I_c/I_{c0}=0.9$ 로 저하를 가져오는 응력을 비가역응력(irreversible stress)이라고 정의하면,  $\sigma_{irr}$ 은 30 mm 구간에서 측정한 경우는 150 MPa로, 10 mm 구간에서의 65 MPa보다 2.3배 높은 값을 나타내었다. 한편 비가역구간에서는 압축응력을 0 MPa로 제하한 후에도  $I_c$ 의 회복은 거의 일어나지 않아서 횡방향 압축의 경우, 압축의 초기에 손상이 발생하였고, 이로 인해 임계전류의 저하를 가져온다는 것을 알 수 있다. 이러한 전압단자간 거리에 따른  $I_c$  저하 거동의 차이는, HTS BSCCO테이프재 특유의 flux flow에 따른 시스부로의 전류분류에 따른 낮은 n 값을 나타내는 것에 기인하였다. 이것은 전압단자 간격이 큰 경우 기준전기장 값이 높아져 그로 인한 차에 기인하였다고 생각된다.[4] 이것은 높은 n 값을 갖는 저온용 금속계 혹은 산화물계 초전도체에서와는 다른 거동으로 생각된다.[5] 이것은 두 전압단자간 I-V선도의 비교로부터도 확인할 수가 있었다. 따라서 HTS 테이프의 횡방향 압축시험과 같은 국부적인 손상에 따른  $I_c$ 의 저하 거동 및 임계특성치 평가시 주의가 필요하다는 것

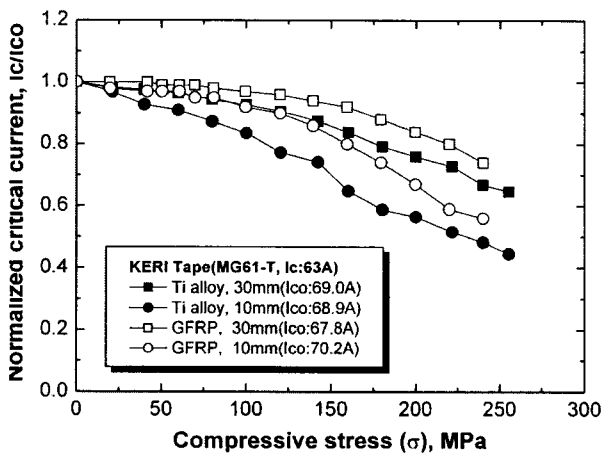


Fig. 3.  $I_c/I_{c0}$ - $\sigma$  relationship during transverse compressive testing in Bi-2223 tapes at 77K.

을 알 수 있다.

한편 사용한 상부 압력블록의 재질의 영향은 거의 나타나지 않지만, 10mm 구간에서 측정한 경우, Ti합금재 블록을 사용한 경우가 GFRP 블록을 사용한 경우보다 약 20 MPa의  $\sigma_{irr}$ 의 저하를 나타내었다.

Fig. 4는 KERI시작선재의  $I_c/I_{c0}$ - $\sigma$ 관계에 미치는 시료의 제조 과정에 따른 영향을 보여주고 있는데, AgMg합금시-스재의 경우,  $I_c$ 가 높은 선재일수록, 낮은 압축응력에서 임계전류의 저하가 시작되었고, 응력의 증가와 더불어 보다 현저하게 열화하는 거동을 나타내었다. 그러나  $I_c$ 가 낮은 MG55-N, -T재의 경우는 100 MPa까지 거의  $I_c$ 의 저하없이 우수한 강도특성을 나타내었다. 또한 시-스합금의 영향을 비교해 보면, AgMg시-스재보다 낮은 영률 및 항복강도를 나타내는 AgMn시-스재의 경우(MN55-N)는 낮은  $I_c$  특성을 나타냄에도 불구하고 MG61-T재와 같은 정도의  $I_c$  열화거동을 나타내었다. 이러한 거동은 Fig. 5에 보인 n 값- $\sigma$  관계로부터도 볼 수가 있다.  $I_c$ 가 높은 MG61-N, -T 및

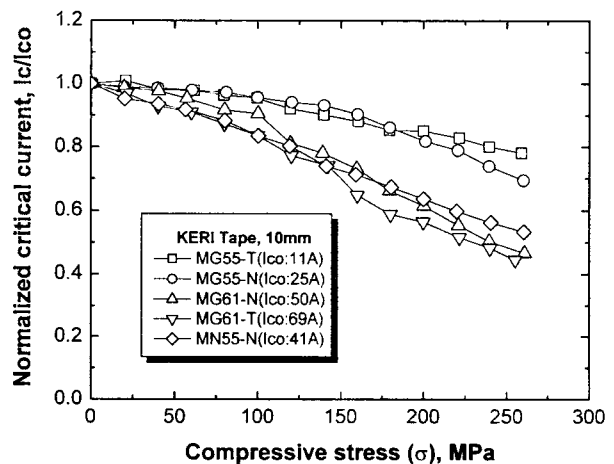


Fig. 4.  $I_c/I_{c0}$ - $\sigma$  relationship in KERI fabricated Bi-2223 tapes.

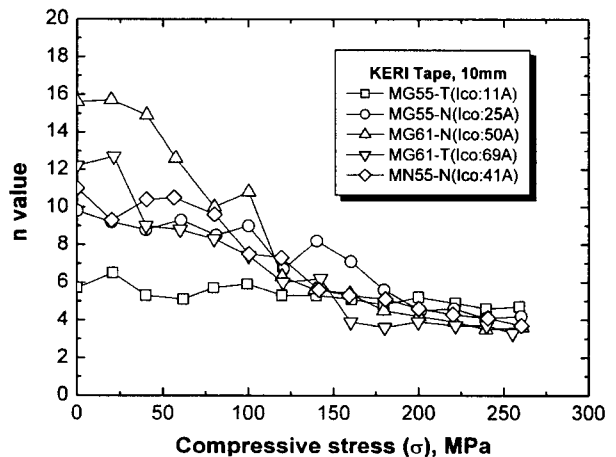


Fig. 5. Relationship between n value and transverse compressive stress in KERI fabricated Bi-2223 tapes.

MN55-N재는 150 MPa까지  $n$  값의 현저한 저하를 나타내었고, 이후는 거의 일정한 값을 나타내었다. 즉 초기에는 횡방향 압축응력의 증가에 따른 테이프 내부에서 초전도필라멘트부에 균열의 발생 및 성장이 시-스부로 분류를 현저하게 증가시키게 되어, 150MPa 이후에는 균열이나 손상의 진전에도 불구하고 더 이상의 분류는 일어나지 않았다는 것을 의미한다. 특히  $I_c$ 가 낮은 경우(MG55-T, -N)는 압축응력이 증가하여도  $n$  값은 거의 일정한 값을 나타내었다. 이러한 거동은 앞으로 손상 거동의 관찰을 통해 확인되어야 한다.

다음은 비교를 위해, 시판(AMSC사) 선재를 사용하여 측정된  $I_c/I_{c0}$ - $\sigma$  거동을 Fig. 6에 나타내고 있다. 스테인리스강 박판 (SUS304)으로 테이프선재의 양측을 보강한 경우와 보강하지 않은 테이프선재 두 종류의 선재에 대한 압축실험결과이다. 약 130 A부근의 높은  $I_c$  값을 가지고 있는데 비하여, 외부보강을 하지 않는 경우는 전압단자 간격이 30 mm임에도 불구하고  $\sigma_{irr}$ 는 35 MPa로 낮은 값을 나타내었고, 200 MPa의 압축응력에서는 45%까지  $I_c$ 가 열화하는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 Ag 시-스재의 경우 Ag합금시-스재(Fig. 4)의 경우보다 횡방향 압축응력에 따른  $I_c$  저하가 현저하는 것을 알 수 있다. 반면 Bi-2223테이프의 양면을 스테인리스강 박판으로 보강한 경우는 거의  $I_c$  저하를 나타내지 않았고, 10 mm 구간에서 측정된 경우에서도  $\sigma_{irr}$ 는 125 MPa의 큰 값을 나타내었고, 200MPa에서도 80%의  $I_c$  값을 유지하였다. 따라서 초전도 마그넷이나 코일에 BSCCO 테이프를 적용할 경우, 예상되는 횡방향 압축응력에 따른 임계전류의 열화 특성을 보완하기 위해서는 시-스합금의 고강도화 혹은 고강도 금속의 적층을 통한 외부보강이 필요하다는 것을 알 수 있다.

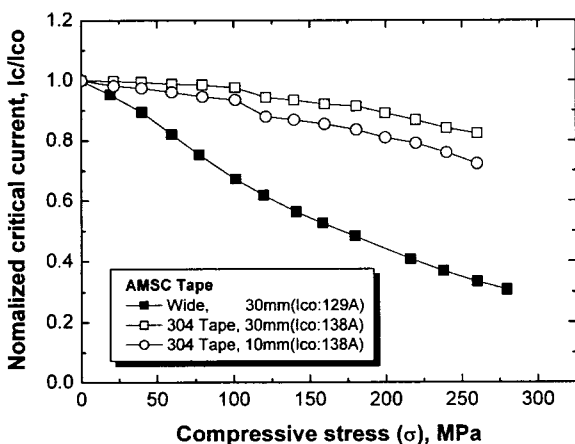


Fig. 6.  $I_c/I_{c0}$ - $\sigma$  relationship in Bi-2223 tapes (AMSC tapes).

#### 4. 결론

(1) 횡방향압축하에서 Ag합금시-스 Bi-2223 테이프는 낮은 압축응력에서부터 임계전류가 저하하는 거동을 나타내었다. AgMg시-스재의 경

우는  $I_c$ 가 높을수록 낮은  $\sigma_{irr}$ 을 나타내었고, 압축 응력에 증가에 따라 현저한 열화특성을 나타내었다.

(2) 횡방향 압축응력에 따른 Bi-2223테이프의  $I_c$  열화 특성은 전압단자 간격에 영향을 크게 받았다. 이것은 Bi-2223 초전도선재의 낮은  $n$  값 특성과 국부적인 손상 발생에 기인하였다는 것을 알 수 있었다.

(3) Bi-2223 초전도 테이프의 횡방향 압축응력 특성은 시-스합금의 고강도화 또는 고강도재료의 외부보강을 통해 개선이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 아울러 임계전류측정시 실험에 협조해 준 안동대학교 기계공학부 김기현군, 최호연군에게 감사를 드린다.

#### [참고 문헌]

- [1] K. Osamura, M. Sugano, T. Wada and S. Ochiai, Mechanical properties of Ag/Bi2223 composite superconductors, *Adv. Cryo. Eng. Materials*, Vol. 46, pp. 639-645 (2000).
- [2] H. Kitaguchi, K. Itoh, T. Takeuchi, K. Togano, H. Wada. Strain effect in Bi-based oxide/Ag superconducting tape. *IEEE Trans. Applied Super.* Vol, No. 11 pp.3058-3061 (2001).
- [3] D. Dietderich, R. M. Scanlan, T. Hasegawa, Y. Aoki, R. S. Sokolowski and L. R. Motowidlo, Critical current variation as a function of transverse stress of Bi-2212 Rutherford cables, *IEEE Trans. Applied Super.*, Vol. 11, pp. 3577-3570 (2001).
- [4] G. Nishijima, T. Ogura, T. Okamura, S. Kabashima, E. S. Yoneda, S. Nomura and H. Nakagome, Electric field and current characteristics of Bi 2212/Ag Superconducting tapes during flux flow state, *Cryogenic Eng. Jpn*, Vol. 33, pp. 382-389 (1998).
- [5] K. Katagiri, K. Kuroda, H. Wada, H. S. Shin, K. Watanabe et al, Tensile strain/ Transverse compressive stress effects in bronze processed Nb-Matrix Nb<sub>3</sub>Sn wires, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 5, No. 2, pp. 1900-1904 (1995).